



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 102 26 444 A1 2004.01.15

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 102 26 444.9

(22) Anmeldetag: 13.06.2002

(43) Offenlegungstag: 15.01.2004

(51) Int Cl.⁷: **G01B 11/02**

(71) Anmelder:

**Samland, Thomas, Dipl.-Math., 78166
Donaueschingen, DE**

(72) Erfinder:

gleich Anmelder

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

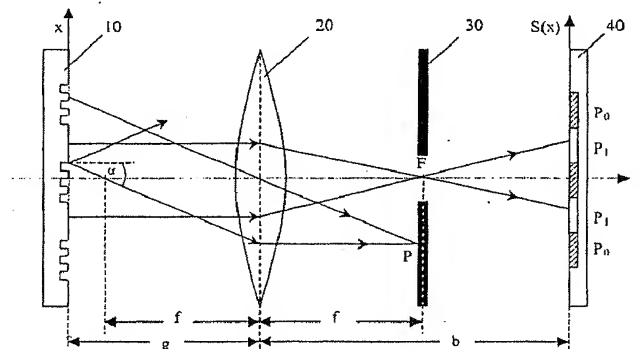
(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur mikrooptischen Positionsmessung**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Positionsmessgerät beschrieben, welches ein mittels diffraktiven optischen Elementen (DOEs) mikrostrukturierten transmissiven Maßstab (10) durch einen Abtaster (40) elektro-optisch detektiert. Dabei sind die DOEs auf der Maßverkörperung (10) derart gestaltet, dass eine Unterdrückung der nullten Beugungsordnung auftritt. In einer ersten Variante wird eine Feldblende (7) verwendet und der Abtaster (40) in ausreichend großer Entfernung zum Maßstab (10) positioniert.

In einer weiteren Ausbaubauweise wird eine refraktive Linse (20) mit positiver Brennweite (f) zwischen der Maßverkörperung (10) und dem Empfänger (40) eingesetzt, wobei die Linse (20) vorzugsweise nicht weiter als um ihre Brennweite (f) von der Maßverkörperung (10) beabstandet ist. Ferner wird zwischen der Linse (20) und dem Empfänger (40) in der Brennebene der Linse (20) eine Aperturblende (30) mit einer hinreichend kleinen Blendenöffnung positioniert, um die gebeugten Lichtbündel vom Abtaster (40) abzusichern.

Eine dritte Variante sieht die Anordnung eines Maßstabes (10) vor, dessen mikrostrukturierte Seite zur Lichtquelle (5) hinweist, und dass die an den DOE des Maßstabes (10) gebeugten Strahlen am Inneren des Maßstabes (10) auf der dem Abtaster (40) zugewandten Seite total reflektiert werden.

Vorzugsweise werden als diffraktiver optischer Code auf der Maßverkörperung (10) Transmissions-Stufen-Phasengitter verwendet.



Beschreibung

[0001] Gegenstand der Erfindung ist eine Vorrichtung sowie ein Verfahren zur mikrooptischen Positionsmessung, i.e. zur absoluten oder inkrementalen Messung von Winkeln oder Längen. Hierzu wird die Relativbewegung zwischen einem Maßstab, auch Maßverkörperung genannt, welcher eine binäre Codierung trägt, und einem lichtempfindlichen Empfänger, auch Abtaster genannt, gemessen. Der Maßstab wird mit dem Licht einer Lichtquelle beleuchtet. Oftmals wird hierfür eine im infraroten Spektrum emittierende Leuchtdiode (IR-LED) eingesetzt. Vorzugsweise wird das Licht parallel kollimiert und trifft anschließend auf den Maßstab.

[0002] Es gibt reflektive und transmissive Messsysteme. Bei den reflektiven Messsystemen sind Lichtquelle und Abtaster auf der gleichen Seite des Maßstabes angeordnet und der Maßstab weist unterschiedlich stark reflektierende Bereiche auf. Bei transmissiven Messsystemen ist der Maßstab zwischen der Lichtquelle und dem Abtaster positioniert und der Maßstab weist unterschiedlich stark transmittierende Bereiche auf.

[0003] Im Gegensatz zu magnetischen, potentiometrischen, induktiven oder Ultraschall-Messgeräten weisen optische Maßstäbe eine sehr kleine Codeteilung bis zu einigen Mikrometern und somit eine hohe Mess-Genauigkeit auf.

[0004] Der Abtaster weist halbleitende lichtempfindliche Schichten auf, die im Emissionsspektrum des verwendeten Lichtsenders eine hohe Empfindlichkeit aufweisen. Da Silizium als Halbleitermaterial eine hohe Empfindlichkeit im infraroten Bereich aufweist, werden Infrarot-LED als Beleuchtung eingesetzt. Es besteht die Möglichkeit, Silizium-Chips im CMOS-Prozess herzustellen, die bereits mehrere getrennte, entsprechend der Codierung des Maßstabes strukturierte Empfängerflächen aufweisen und darüber hinaus bereits einen Teil der Signalverarbeitung, wie etwa die Signalverstärkung und die Interpolation aufweisen kann. Die Empfängerflächen sind vorzugsweise durch Photodioden oder Photo-Transistoren ausgestaltet.

[0005] Das vom Maßstab durch eine Relativbewegung modulierte und von den Empfängerflächen des Abtasters rezipierte Licht wird in elektrische Positions-Signale umgewandelt. Diese werden anschließend einer elektronischen Weiterverarbeitung zugeführt.

[0006] Absolute Positionssignale entstehen durch die Abtastung von in eindeutiger Weise binär codierten Flächen auf dem Maßstab. Ein absoluter Code besteht jeweils aus mehreren Codefeldern, die auf einer Codespur hintereinander oder auf mehreren Spuren nebeneinander auf dem Maßstab angeordnet sind und die sich auf der gesamten Messstrecke, d.h. beim Winkelmessgerät über eine volle Umdrehung, nicht wiederholen, so dass die Codefelder gemeinsam abgetastet eine Position eindeutig definieren.

[0007] Inkrementale Positionssignale geben eine Positions-Änderung wieder, indem periodisch abwechselnde binäre Codefelder abgetastet werden. Werden hierbei sinusförmige analoge Signale generiert, so kann durch eine nachgeschaltete Interpolations-Einheit die Auflösung erhöht werden.

[0008] Bisherige optische Winkel- und Längenmessgeräte verwenden Maßstäbe mit einer strukturierten Chromschicht. Die binären Positionscodes sind im transmissiven Fall durch chrombedeckte bzw. nicht-chrombedeckte transparente Flächen verwirklicht. Derartige Maßstäbe werden in der Regel UV-lithographisch hergestellt. Hierzu wird vorzugsweise auf dem Trägermaterial, im transmissiven Falle etwa aus Glas oder Kunststoff bestehend, eine Lackschicht, das sogenannte Resist, aufgesputtert und anschließend durch eine Maske hindurch mit UV-Licht belichtet. Nach einem Ätzvorgang bleibt im Falle der Verwendung eines negativen Resists nur der belichtete Lack übrig. Anschließend wird eine dünne Chromschicht aufgedampft und die Chromschicht, die auf dem verbliebenen Photolack aufgedampft wurde, wird entfernt.

[0009] Neben dem aufwendigen Herstellungsverfahren ist ein weiterer Nachteil bei Verwendung obiger Maßstäbe, dass bei der Verwendung von kleinen Codefeldern Licht-Beugung auftritt und daher der Abstand zwischen dem Maßstab und dem Abtasten sehr klein gehalten werden muss, um ein Überstrahlen des Lichtes infolge von Beugung in benachbarte Empfängerfelder auf dem Abtast-Chip zu vermeiden. Insbesondere weist das Messsystem an dieser Stelle sehr kleine Abstands-Toleranzen auf.

[0010] Im Gegensatz zu oben beschriebenen Maßstäben werden erfindungsgemäß Maßstäbe mit einer binären Codierung, welche durch diffraktive optische Elemente (DOE) strukturiert oder unstrukturiert sind, verwendet. Die DOE's bestehen dabei vorzugsweise aus einem Durchlicht-Phasen-Stufengitter welches gemäß der Beziehung

$$h = \frac{k\lambda}{2(n-1)}$$

mit ungerader

[0011] ganzer Zahl (k), Stufenhöhe (h), Wellenlänge (λ) der Lichtquelle und dem Brechungsindex (n) des Maßstabs-Materials eine Auslöschung der nullten Beugungsordnung ergibt.

[0012] Ein wesentlicher Vorteil dieser diffraktiven mikrostrukturierten Maßstäbe ist die Möglichkeit der Replikation. Hierzu wird ein mikrostrukturiertes Masterwerkzeug hergestellt, welches anschließend etwa mittels Spritzguss, Heißprägung, UV-Prägeverfahren oder vergleichbaren mikrosystemtechnischen Fertigungsverfahren vorzugsweise in Kunststoffe abgeformt wird. Diese Fertigungsverfahren erlauben eine preiswerte Massen-

fertigung der Maßstäbe.

[0013] Ein derartiges Messsystem ist etwa in DE 100 25 410 beschrieben. Es werden lediglich die unstrukturierten Codefelder delektiert. Da die Codefelder, die durch diffraktive optische Elemente (DOE's) strukturiert sind, seitlich ebenfalls Licht aussenden, ist dafür Sorge zu tragen, dass dieses Licht nicht ebenfalls in Empfängerfelder des Abtasters strahlt.

[0014] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Vorrichtung bzw. ein Verfahren zur mikrooptischen Positionsmessung zu entwickeln, welches diffraktive Maßstäbe verwendet und oben beschriebene Probleme der Abstrahlung des gebeugten Lichtes in seitliche Empfängerfelder vermeidet und gleichzeitig nicht nur einen größeren Abstand zwischen dem Maßstab und dem Abtaster zulässt, sondern auch größere Abstands-Toleranzen. Gleichzeitig wird jedoch im Falle der Verwendung einer abbildenden Optik der Abstand zwischen der Maßverkörperung und dem Abtaster möglichst gering gehalten.

[0015] Diese Aufgabe wird durch die in den unabhängigen Ansprüchen beschriebenen Messsysteme erfüllt. Dies wird etwa dadurch erreicht, dass eine Sammellinse (20) mit positiver Brennweite zwischen dem Maßstab (10) und dem Abtaster (40) angeordnet wird und zudem in der rückseitigen Brennebene der Linse (20) zwischen der Linse (20) und dem Abtaster (40) eine Aperturblende (30) angeordnet wird, deren Durchmesser (a) kleiner ist als das Produkt $2 \cdot f \cdot \tan(\alpha)$, mit Brennweite (f) der Linse (20) und mit Beugungswinkel (α) der minimalen Beugungsordnung, die nicht unterdrückt wird. Nach der Gittergleichung gilt für den Beugungswinkel (α) bei Austreten der ersten Beugungsordnung demnach

$$\sin(\alpha) = \frac{\lambda}{\Lambda}$$

mit Wellenlänge (λ) des emittierten Lichtes und Gitterkonstanten (Λ) des Beugungsgitters. Die nullte Beugungsordnung fällt bei einem Transmissions-Phasengitter unter der Bedingung $h(n-1) = k \lambda / 2$ mit ungerader ganzer Zahl (k) aus. Dabei sei (h) die Stufenhöhe des Gitters, (n) der Brechungsindex des Maßstabes (10) und (λ) die emittierte Wellenlänge des Lichtsenders (5). Insbesondere erhält man mit $k = 1$ für

$$h = \frac{\lambda}{2(n-1)}$$

eine Auslöschung der nullten Beugungsordnung.

[0016] Beträgt die Bildweite (b), i.e. der Abstand zwischen der Linse (20) und dem Abtaster (40), $b > t$; so beträgt der Abbildungsmaßstab (A) auf dem Abtaster in Relation zur Maßverkörperung

$$A = \frac{b-f}{f},$$

so dass sich beispielsweise ein Abbildungsmaßstab (A) von 1 : 1 mit $b = 2f$ ergibt. Gemäß der Abbildungsgleichung gilt:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b},$$

so dass mit $b = 2f$ aus dieser Gleichung $g = 2f$ folgt. Da in diesem Fall der Abstand zwischen der Gegenstandsebene und der Bildebene $4f$ beträgt, wird ein derartiges optisches System auch ein $4f$ -System genannt.

[0017] Wird jedoch parallel kollimiertes Licht zur Beleuchtung verwendet, so tritt nach dem Durchgang durch die diffraktive Maßverkörperung (10) weitgehend jeweils parallel gebündeltes Licht auf: Das Licht, das auf die unstrukturierten Code-Felder der Maßverkörperung (10) fällt, transmittiert ungestört und bleibt parallel zur optischen z-Achse. Das Licht, das auf die DOE's der Maßverkörperung (10) fällt, wird in Richtung der Beugungsordnungen gebeugt, wobei die nullte Beugungs-Ordnung ausfällt. D.h. das Licht propagiert an diesen Stellen nicht parallel zur optischen Achse, sondern in Richtung der Beugungsordnungen. Damit bilden sich schräg-parallele Lichtbündel gleicher Beugungsordnung verschiedener DOE's. Diese werden in der Brennebene der Linse (20) mit einem Abstand von $2 \cdot f \cdot \tan(\alpha)$ zur optischen Achse fokussiert, wobei (α) den jeweiligen Beugungswinkel bezeichne.

[0018] Insbesondere kann auch unter der obigen Bedingung mit $b = 2f$ aufgrund der parallelen Lichtbündel der Abstand (g) zwischen der Maßverkörperung (10) und der Linse (20) kleiner sein als $2f$ mit einer Brennweite (f) der Linse (20). Insbesondere erhält man mit $g = f$ ein optisches System mit einem Abstand zwischen Gegenstands- und Bildebene von $3f$. Unter dieser Bedingung $g = f$ wird der Maßstab (10) nach unendlich abgebildet.

[0019] Optional wird eine zweite Linse (21) ebenfalls mit positiver Brennweite (f') zwischen der Aperturblende (30) und dem Abtaster (40) eingesetzt. Ist der Abstand der Linse (21) zur Aperturblende (30) gerade gleich der

Brennweite (f') der Linse (21), so werden diejenigen Strahlen, die in der Aperturbene durch den rückseitigen Brennpunkt (F) der Linse (20) bzw. dem vorderen Brennpunkt (F') der Linse (21) laufen, wieder parallel ausgerichtet und der Abbildungsmaßstab (A) beträgt somit

$$A = \frac{f'}{f}.$$

Insbesondere beträgt der Abbildungsmaßstab (A) genau dann 1 : 1, wenn gilt: $f = f'$.

[0020] Es ist die Erfindung in den Zeichnungen dargestellt. Es zeigt die

[0021] **Fig. 1** schematisch den Grundaufbau des optischen Positionsmessgerätes (1) unter Verwendung einer einzigen Linse (20) mit der Brennweite (f), die

[0022] **Fig. 2** zeigt denselben Aufbau mit der Verwendung von zwei Linsen (20, 21) mit den Brennweiten (f) und (f'), die

[0023] **Fig. 3** zeigt einen seitlichen Schnitt aus einem Maßstab (10). Das parallel einfallende Licht (unten) wird an den mikrostrukturierten Gitterflächen derart gebeugt, dass die nullte Beugungsordnung ausfällt. Dargestellt sind die \pm -ersten Beugungsordnungen, die in einem Winkel (α) von der optischen Achse abgelenkt propagieren. Höhere Beugungsordnungen sind hier nicht dargestellt; sie werden gemäß der Gittergleichung noch weiter seitlich abgelenkt, d.h. der Winkel, um welchen höhere Beugungsordnungen von der optischen Achse abgelenkt werden, ist noch größer.

[0024] Die **Fig. 4** zeigt schematisch den Gesamtaufbau eines optischen Positionsmessgerätes (1) mitsamt dem Maßstab (10), der abbildenden Optik, bestehend aus der Linse (20) und der Aperturblende (30), dem Abtaster (40) und der Beleuchtungseinrichtung, bestehend aus einem Licht-Sender (5), einer Feldblende (7) und einer Kollimatorlinse (6) zur parallelen Kollimation des Lichtes bei gleichzeitig möglichst gleichmäßiger Ausleuchtung des Maßstabes (10). Alle optischen Bauteile, wie der Lichtsender (5), die Kollimatorlinse (6), die abbildende Optik (20), die Aperturblende (30) und der Abtaster (40) sind optisch zentriert angeordnet, d.h. sie liegen mutig auf der optischen Achse (z), während der Maßstab (10) senkrecht relativ zu obigen Bauteilen in x -Richtung verfahrbar ist.

[0025] Die **Fig. 5** zeigt beispielhaft eine binäre Codierung, aufgebracht auf eine Codescheibe, bestehend aus zwei äußeren Inkrementalspuren und zwei inneren absolut codierten Codespuren zur Verwendung in einem Winkelmessgerät (1). Dabei sind die dunklen Flächen (101) mit mikrostrukturierten DOE's versehen und die hellen Flächen (102) der Maßverkörperung (10) sind unstrukturiert.

[0026] Vorzugsweise werden die diffraktiven Elemente in Form von Linien-Stufengittern realisiert. Im Falle von Winkelmessgeräten sind die Codespuren radial angeordnet. Ist die Breite der Codespuren klein im Vergleich zum Radius der Codespuren, so können die Linien des Beugungsgitters radial angeordnet werden. Liegt die Breite der Codespuren jedoch in derselben Größenordnung wie der Spur-Radius, so sollten die Linien des Beugungsgitters vorzugsweise parallel liegen.

[0027] In der **Fig. 6** ist eine lineare Maßverkörperung (10), auch Messlineal genannt, dargestellt, welche eine rein inkrementale Codierung in Form von periodisch abwechselnd mikrostrukturierten Bereichen (101) und unstrukturierten Bereichen (102) trägt. Dabei sind die mikrostrukturierten Codefelder (101) vorzugsweise mit Linien-Beugungsgittern versehen.

[0028] Die **Fig. 7** veranschaulicht den Aufbau des Durchlicht-Stufengitters, das als optisches Phasengitter wirkt. Das Grundmaterial (11) des Maßstabes (10) bildet die Gitterstege aus und weist einen Brechungsindex (n_1) auf, welcher vom Brechungsindex (n_0) des die Furchen ausfüllenden Substrates (12) verschieden ist. Die Dicke (d) des Substrates (12) kann über die Höhe (h) des Stufengitters hinausgehen; die Substratdicke (d) kann jedoch auch gleich oder kleiner sein als die Höhe (h) der Stufen des Phasengitters. Weiterhin kann das Substrat (12) auch ganz fehlen bzw. aus der Umgebungsluft bestehen. In diesem Fall ist der Brechungsindex $n_0 \approx 1$.

[0029] Die **Fig. 8** stellt den Fall dar, dass die Maßverkörperung (10) von der mikrostrukturieren Seite aus beleuchtet wird. Hier ist ein Stufengitter mit Gitterperiode Λ als DOE dargestellt, welches vorteilhaft zum Einsatz kommt.

[0030] In der **Fig. 9** ist ein Positionsmesssystem (1) dargestellt, welches ohne Linsen (20, 21) und Aperturblende (30) auskommt.

[0031] Das in der **Fig. 8** parallel zur optischen Achse (z) einfallende Licht fällt auf das Beugungsgitter der Periode (Λ) und wird unter Ausfall der ersten Beugungsordnung in die erste auftretende Beugungsordnung um den Winkel (α) abgelenkt. Beim Verlassen des Maßstabes (10) wird der Lichtstrahl refraktiv gebrochen. Nach Snellius gilt $\sin(\beta) = n \sin(\alpha)$, wobei (n) der Brechungsindex des Maßstabmaterials (10) sei. Die gebeugten Lichtstrahlen verlassen den Maßstab (10) demnach in der **Fig. 8** Um den Winkel (β) von der optischen Achse (z) abgelenkt im Gegensatz zum Winkel (α) in dein Fall, dass die mikrostrukturierte Seite des Maßstabes (10) zum Abtaster (40) hin weist, wie in den **Fig. 1** bis 4 dargestellt.

[0032] Wird der Maßstab (10) von der mikrostrukturierten Seite aus beleuchtet, so tritt Totalreflexion an der unstrukturierten Innen-Seite des Maßstabes (10) auf, wenn der Beugungswinkel (α) hinreichend groß ist. Dies

ist nach Snellius der Fall für

$$\sin(\alpha) \geq \frac{1}{n},$$

wobei (n) der Brechungsindex des Maßstabsmaterials (10) sei. Beispielsweise erhält man als Grenzwinkel für die Totalreflexion mit einem Brechungsindex (n) des Maßstabsmaterials 10 von $n = 1,5$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,5}\right) = 41,8^\circ.$$

[0033] Wird als DOE ein Transmissions-Phasen-Stufengitter mit Gitterperiode (Λ) verwendet, deren erste Beugungsordnungen auftreten und wird das Beugungsgitter mit Licht der Wellenlänge (λ) beleuchtet, so gilt nach der Gittergleichung:

$$\sin(\alpha) = \frac{\lambda}{\Lambda},$$

wobei (α) der Beugungswinkel der ersten Beugungsordnung sei. Unter der Bedingung

$$\sin(\alpha) \geq \frac{1}{n}$$

tritt Totalreflexion ein und es folgt somit:

$$\frac{\lambda}{\Lambda} \geq \frac{1}{n} \text{ bzw. } \Lambda \leq n \lambda.$$

Höhere Beugungsordnungen werden dann ebenfalls total reflektiert, da ihr Beugungswinkel noch größer ist als der Beugungswinkel (α) der ersten Beugungsordnung.

[0034] Mit $n = 1,5$ und $\lambda = 0,88 \mu\text{m}$ (IR-Licht) folgt beispielsweise aus obiger Ungleichung $\Lambda \leq n\lambda$ als Bedingung für das Auftreten von Totalreflexion der ersten und auch der höheren Beugungsordnungen an der Innenseite des Maßstabes (10) auf der unstrukturierten, dem Abtaster (40) zugewandten Seite: $\Lambda \leq 1,32 \mu\text{m}$.

[0035] Da es aufwendig ist, derart kleine Gitterperioden (Λ) herzustellen, ist die Beleuchtung mit längerwelligem Licht oder die Verwendung von Maßstabsmaterialien (10) mit größeren Brechungsindizes (n) ratsam.

[0036] Im Falle des Auftretens von Totalreflexion bei einer Verwendung eines Maßstabes (10), dessen mikrostrukturierte Seite zur Beleuchtungseinheit hin weist, wird keine Blende (30) benötigt. Auch die Verwendung einer oder mehrerer Linsen (20, 21) ist nicht notwendig, jedoch möglich, und insbesondere in dem Fall sinnvoll, um den Abbildungsmaßstab zu verändern.

[0037] In der Fig. 1 ist der Grundaufbau des Positionsmesssystems (1) dargestellt. Das Positionsmesssystem (1) kann dabei linear messend oder auch rotativ messend als Winkelmesssystem ausgestaltet sein. Gemessen wird eine Relativbewegung in x-Richtung zwischen dem Maßstab (10) und dem Empfänger (40), welcher oftmals in Form eines integrierten Halbleiter-Chips vorliegt und photo-elektrische halbleitende Schichten aufweist. Oftmals wird hierfür das chemische Element Silizium verwendet, zum einen wegen der hohen Verfügbarkeit, weiterhin wegen der guten Empfindlichkeit im nahen Infrarot-Bereich und wegen der Möglichkeit, etwa im CMOS-Prozess weitere elektronische Schaltelemente auf demselben Halbleiter-Substrat zu planieren.

[0038] Die Relativbewegung zwischen dem Maßstab (10) und dem Empfänger (40) bedeutet in Winkelmessgeräten in der Regel eine Drehung eines Codescheibe genannten runden Maßstabes (10), während in Längenmessgeräten namentlich großer Messlängen vorzugsweise der Maßstab (10), in diesem Falle auch Mess-Lineal genannt, feststeht und die Baueinheit, bestehend aus Lichtquelle (5) und Empfänger (40), beweglich ausgestaltet ist.

[0039] Der Maßstab (10) in der Fig. 1 wird vorzugsweise mit parallel kollimiertem Licht beleuchtet. Der Lichtsender (5) ist dabei vorzugsweise eine Leuchtdiode (LED), welche hinreichend kohärentes Licht im infraroten (IR) Spektrum emittiert. Auch die Verwendung einer Lichtquelle mit sehr langen Kohärenzlängen in Form eines Lasers ist möglich, jedoch in der Regel selbst für Positionsmessgeräte mit diffraktiven Codestrukturen nicht notwendig, da die zur Interferenz notwendigen Kohärenzlängen höchstens einige Mikrometer betragen.

[0040] Die Kohärenzlänge (L) des Lichtes hängt von der Frequenz-Bandbreite ($\Delta\omega$) des Licht-Emitters ab. Es gilt näherungsweise:

$$L \approx \frac{c}{\Delta\omega}.$$

Mit $\Delta\omega = 2 \pi \Delta f$ ergibt sich die Kohärenzlänge (L) angenähert zu

$$L \approx \frac{\lambda^2}{2\pi\Delta\lambda},$$

so dass man beispielsweise bei einer Center-Wellenlänge von $\lambda = 880 \text{ nm}$ mit einer Bandbreite der emittierten Wellenlänge einer IR-LED von $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ eine Kohärenzlänge (L) von $L \approx 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ erhält.

[0041] Die optische Weglängendifferenz einer Lichtwelle, welche das Beugungsgitter an einer Gitterstufe verläßt, beträgt gegenüber einer Lichtwelle, die das Beugungsgitter an einer Gitterspalte verläßt, vorzugsweise eine halbe Wellenlänge, damit es zur Auslöschung der nullten Beugungsordnung kommt. Die erste Beugungsordnung entsteht in den Richtungen, für welche der optische Wegunterschied die Wellenlänge (λ) beträgt. Somit ist in obigem Beispiel die Kohärenzbedingung erfüllt.

[0042] In den **Fig. 1** bis **4** weist die mikrostrukturierte Seite des Maßstabes (**10**) von der Beleuchtungseinheit weg, d.h. der Maßstab (**10**) wird auf seiner unstrukturierten Seite beleuchtet und die strukturierte Seite weist zur Linse (**20**) hin. Dass der Maßstab auch umgekehrt angeordnet werden kann, d.h. mit seiner strukturierten Seite zur Beleuchtung hin, zeigt die **Fig. 8**.

[0043] In den **Fig. 1**, **2** und **4** erkennen wir die Bewegungsrichtung (x) des Maßstabes (**10**) sowie die dazu senkrecht stehende optische Achse (z). Den prinzipiellen schematischen Aufbau des Positionsmesssystems (**1**) erkennen wir in der **Fig. 4**: Das emittierte Licht des Lichtsenders (**5**) transmittiert zunächst eine Sammellinse (**6**) und fällt parallel kollimiert auf den Maßstab (**10**). Der Maßstab (**10**) weist, wie in der **Fig. 3** oder auch den **Fig. 5** bis **8** am deutlichsten dargestellt, einerseits unstrukturierte Bereiche (**102**) und andererseits durch diffraktive optische Elemente (DOE's) in Form von Beugungsgittern mikrostrukturierte Bereiche (**101**) auf. Bei inkrementalen Maßstäben (**10**) weisen die mikrostrukturierten Codefelder (**101**) und die unstrukturierten Codefelder (**102**) vorzugsweise die gleiche Länge ($m\Lambda$) einer Anzahl von (m) Gitterperioden auf. Dabei sei (Λ) die Gitterkonstante des Beugungsgitters. Die Höhe (h) des Gitters ist verantwortlich für die Verteilung der Energie auf die einzelnen Beugungsordnungen. Dabei sei die Höhe (h) derart bestimmt, dass die nullte Beugungsordnung unterdrückt werde. Somit treten an den mikrostrukturierten Stellen des Maßstabes (**10**) lediglich höhere Beugungsordnungen auf. In der **Fig. 3** sind die \pm ersten Beugungsordnungen dargestellt, welche zur optischen Achse (z) hin einen Beugungswinkel (α) einschließen. An den unstrukturierten Stellen des Maßstabes (**10**) propagiert das Licht ungebeugt parallel zur optischen Achse (z).

[0044] Die nullte Beugungsordnung fällt unter der Bedingung aus, dass die optische Weglängendifferenz zwischen einer Welle, die das Beugungsgitter in einer Spalte verläßt, gegenüber einer Welle, die das Stufengitter an einer Stufe verläßt, ein ungeradzahliges Vielfaches einer halben Lichtwellenlänge beträgt. Die optische Weglänge besteht aus dem Produkt aus der geometrischen Länge multipliziert mit dem Brechungsindex des Mediums, in welchem das Licht propagiert, daher folgt: $h(n_1 - n_0) = k\lambda/2$ mit Wellenlänge (λ) des Lichtes, ungerader ganzer Zahl (k) und Brechungsindex (n_1) des transmissiven Maßstabes (**10**) inklusive der Gitterstufen (**11**) und (n_0) sei der Brechungsindex der die Gitterspalten ausfüllenden Substanz (**12**). Fehlt diese Substanz (**12**) und füllt Luft die Gitterspalten aus, so ist n_0 der Brechungsindex der Luft, also $n_0 \approx 1$.

[0045] Ist, wie in der **Fig. 7** dargestellt, (ϕ) die Phasenverschiebung der interferierenden Teilwellen (**100**) und (**200**) der Wellenlänge (λ), (h) die Stufenhöhe des Durchlicht-Phasengitters und (n_1) der Brechungsindex des Gitters inklusive der Gitterstufen (**11**) und (n_0) der Brechungsindex des die Gitterspalten vollständig ausfüllenden Mediums (**12**), so gilt:

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{h(n_1 - n_0)}{\lambda}.$$

Eine Phasenverschiebung $\phi = k\pi$ mit ungerader ganzer Zahl (k) führt zur Auslöschung der nullten Beugungsordnung und damit zur erforderlichen Stufenhöhe h des Phasengitters von

$$h = \frac{\lambda}{2(n_1 - n_0)}$$

für $k = 1$. Ist das umgebende Medium Luft, so gilt $n_0 \approx 1$ und somit folgt für die Stufenhöhe h des Stufengitters:

$$h = \frac{\lambda}{2(n_1 - 1)}.$$

[0046] In den **Fig. 1** und **2** sind Lichtstrahlen dargestellt, welche von unstrukturierten Stellen des Maßstabes (**10**) aus ungebeugt parallel zur optischen Achse (z) propagieren, und solche, die an den diffraktiv mikrostrukturierten Stellen des Maßstabes (**10**) gebeugt werden. In den **Fig. 1** und **2** sind lediglich jeweils die erste auftretende Beugungsordnung gezeichnet; höhere Beugungsordnungen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

[0047] Die von den unstrukturierten Stellen des Maßstabes (**10**) ausgehenden, ungebeugten und parallel zur

optischen Achse (z) verlaufenden Strahlen werden von der refraktiven Linse (20) gesammelt, laufen durch den Brennpunkt (F) der Linse (20) und fallen in die Hellfelder (P_1) des Abtasters (40). Insgesamt erhält man eine Lichtverteilung $S(x)$ in der Ebene des Abtasters (40), welche abhängig ist von der Lage (x) des Maßstabes (10). [0048] Der Abbildungsmaßstab (A) beträgt bei Nutzung von lediglich einer einzigen Linse (20)

$$A = \frac{b - f}{f}$$

mit Bildweite (b) und Brennweite (f) der Linse (20). Insbesondere ergibt sich ein Abbildungsmaßstab (A) von 1:1 unter der Bedingung $b = 2f$.

[0049] Die an den diffraktiven Stellen des Maßstabes (10) gebeugten Strahlen werden um den Beugungswinkel (α) von der optischen Achse (z) abgelenkt und werden nach dem Durchlauf durch die Sammellinse (20) in der Brennebene dieser Linse (20) in einem Punkt (P) vereinigt. Aufgrund der Geometrie der Anordnung ist dieser Punkt (P) um das Produkt aus der Brennweite (f) der Linse (20) multipliziert mit dem Tangens des Beugungswinkels (α) von dem Brennpunkt (F) beabstandet. Somit wird dieses gebeugte Licht ausgeblendet, wenn in der Brennebene der Linse (20) eine Aperturblende (30) angeordnet ist, deren Blenden-Durchmesser (a) kleiner ist als $2 \cdot f \cdot \tan(\alpha)$. Das an den DOE's der Maßverkörperung (10) gebeugte und an der Aperturblende (30) ausgeblendete Licht fällt somit nicht in die Dunkelfelder (P_0) des Abtast-Empfängers (40).

[0050] Im Gegensatz zur Darstellung in den Fig. 1 und 2 ist die Situation etwas anders, wenn wie in der Fig. 8 gezeigt, die mikrostrukturierte Seite des Maßstabes (10) nicht zum Abtaster (40), sondern zur Lichtquelle (5) hin weist. Dann verläßt das gebeugte Licht den Maßstab (10) aufgrund von Refraktion an dem Übergang vom Maßstab (10) zur Luft nicht um den Winkel (α), sondern um den Winkel (β) von der optischen Achse abgelenkt, wobei nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz die Beziehung $\sin(\beta) = n \sin(\alpha)$ gilt. Demnach muss in dieser Situation, d.h. wenn der Maßstab (10) mit seiner mikrostrukturierten Seite zur Beleuchtungseinheit hin weist, der Durchmesser (a) der Aperturblende (30) lediglich kleiner sein als

$$2 \cdot f \cdot \tan(\beta) = 2 \cdot f \cdot \frac{n \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\alpha)}}$$

Es werde der Einfachheit halber angenommen, dass die Objekt- und die Bildbrennweite der Linsen (20) bzw. (21) jeweils übereinstimmen.

[0051] Es ergibt sich aufgrund der Anordnung, dass die Bildweite (b) größer ist als die Brennweite (f) der Linse (20), also dass gilt: $b > f$. Da das durch die Maßverkörperung (10) transmittierende Licht bündelweise parallel ausgerichtet ist, muss die Abbildungsformel

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

mit Brennweite (f) der Linse (20), mit Gegenstandsweite (g) und Bildweite (b) insofern nicht eingehalten werden, als dass die Gegenstandsweite (g) kleiner sein kann, als

$$\frac{fb}{b - f}$$

Insbesondere kann die Gegenstandsweite (g) auch kleiner oder gleich der Brennweite (f) der Linse (20) sein. Für $g = f$ wird der Maßstab (10) nach unendlich abgebildet.

[0052] In der Fig. 2 wird zwischen der Aperturblende (30) und dem Abtaster (40) eine weitere Sammellinse (21) mit positiver Brennweite positioniert. Die Brennweite dieser zweiten Linse (21) betrage (f'), der Brennpunkt (F') falle mit dem Brennpunkt (F) der Linse (20) in der Aperturebene zusammen. Somit wird das Licht aus den unstrukturierten Bereichen des Maßstabes (10), das durch den Brennpunkt (F) der Linse (20) fällt, mittels der Linse (21) wieder parallel ausgerichtet. Der Abbildungsmaßstab (A) beträgt in diesem Falle

$$A = \frac{f'}{f}$$

[0053] Insbesondere erhält man einen Abbildungsmaßstab (A) von 1:1 unter der Bedingung $f = f'$.

[0054] Bei der in der Fig. 9 dargestellten Anordnung zur Positionsmessung wird der Abtaster (40) in einer solchen Entfernung vom durch eine Feldblende (7) beleuchteten Maßstab (10) positioniert, dass die von den diffraktiven optischen Elementen gebeugten Strahlen nicht auf den Maßstab (10) treffen. Eine vor dem Maßstab (10) positionierte Feldblende (7) mit Durchmesser (D) läßt die Beleuchtung des Maßstabes (10) mit vorzugsweise parallelem Licht zu. Das Licht, welches an den DOE's des Maßstabes (10) gebeugt wird, wird um den

Winkel ($\pm \gamma$) von der optischen Achse (z) abgelenkt. Je nachdem, ob die DOE's zur Feldblende (7) oder zum Maßstab (40) hin weisen, beträgt der Winkel $\gamma = \beta$ mit $\sin(\beta) = n \sin(\alpha)$ bzw. $\gamma = \alpha$ mit dem Beugungswinkel (α) der ersten nicht-unterdrückten Beugungsordnung. Höhere Beugungsordnungen werden um noch größere Winkel von der optischen Achse (z) abgelenkt.

[0055] In einer hinreichend großen Entfernung (L) liegt der Abtaster (40) im Schattenbereich der gebeugten Lichtbündel. Es gilt der Zusammenhang

$$\tan(\gamma) = \frac{D}{L}.$$

Es ist insofern vorteilhaft, wenn die mikrostrukturierte Seite des Maßstabes (10) zur Feldblende (7) hin weist, da in diesem Fall die gebeugten Strahlen den Maßstab (10) unter dem Winkel (β) mit $\beta > \alpha$ verlassen und somit die notwendige Entfernung (L) zwischen Abtaster (40) und Maßstab (10) kleiner ist, als in dem Fall, dass die mikrostrukturierte Seite des Maßstabes (10) zum Abtaster (40) hin weist und die gebeugten Strahlen den Maßstab (10) unter dem Beugungswinkel (α) verlassen.

[0056] Die Verwendung einer zusätzlichen Aperturblende zwischen dem Maßstab (10) und dem Abtaster (40) erübrigt sich, da diese die parallel zur optischen Achse verlaufenden Strahlenbündel aus den unstrukturierten Codefeldern nicht ausblenden darf und daher keinen kleineren Durchmesser aufweisen kann als die Feldblende (7) und somit den Verlauf der abzuschirmenden gebeugten Strahlenbündel nicht beeinflussen kann.

[0057] Ein wesentlicher Vorteil der beschriebenen und in den Fig. 1, 2 oder 4 dargestellten telezentrischen Anordnung ist die Abstands-Unabhängigkeit zwischen der Maßverkörperung (10) und der Linse (20). Die Anordnung gemäß der Fig. 2 mit zwei Linsen (20, 21) weist darüber hinaus eine Abstands-Unabhängigkeit zwischen der Linse (21) und dem Abtaster (40) auf.

[0058] Ein weiterer Vorteil der in Fig. 8 gezeigten Anordnung im Falle des Auftretens von Totalreflexion an der Rückseite des Maßstabes (10) des an der Vorderseite des Maßstabes (10) gebeugten Lichtes ist die Möglichkeit, ein Messsystem (1) ohne die Verwendung der Linsen (20, 21) und der Blende (30) aufzubauen.

Bezugszeichenliste

Positions-Messeinrichtung	1
Licht-Sender	5
Kollimatorlinse	6
Feldblende	7
Maßstab	10
Maßstabsmaterial (Stufen)	11
Maßstabsmaterial (Spalten)	12
abbildende Linse (positive Brennweite)	20, 21
Aperturblende	30
Abtast-Chip	40
Lichtbündel	100, 200
mikrostrukturierte Codefelder	101
unstrukturierte Codefelder	102
Beugungswinkel der +/- ersten nicht-unterdrückten Beugungsordnungen ...	α
Stufenhöhe der Gitterstufen (11)	h
Dicke des Substrates (12)	d
Gitterkonstante	Λ
Wellenlänge des emittierten Lichtes	λ
Frequenz-Bandbreite des Lichtsenders (5) ..	$\Delta\omega$
Kohärenzlänge	L
Öffnung der Aperturblende (30)	a
Öffnung der Feldblende (7)	D
Brennweite der Linse (20)	f
Brennweite der Linse (21)	f'
Gegenstandsweite der Linse (20)	g
Bildweite der Linse (20)	b
Abbildungsmaßstab	A
Brennpunkt der Linse (20)	F
Brennpunkt der Linse (21)	F'
Sammelpunkt des Lichtes der ersten Beugungsordnung	P
optische Achse	z
Bewegungsrichtung	x
Lichtverteilung in Abhängigkeit von x	$S(x)$
helles Pixel	P_1
dunkles Pixel	P_0
Brechungsindex des Gitters (Stufen) (11) ...	n, n_1
Brechungsindex der Gitterfurchen (12)	n_0

Abkürzungen

CMOS	complementary <u>m</u> etal <u>o</u> xide <u>s</u> emiconductor
DOE	<u>d</u> iffractive <u>o</u> ptical <u>e</u> lement
IR	<u>I</u> nfra- <u>R</u> ot
LED	<u>L</u> ight <u>e</u> mitting <u>D</u> iode
Laser	<u>L</u> ight <u>A</u> mplification by <u>S</u> timulated <u>E</u> mission of <u>R</u> adiation

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur mikrooptischen Positionsmessung mit einer transmissiven Maßverkörperung (10), die eine binäre Codierung in Form von Flächen trägt, wobei diese Flächen entweder diffraktive optische Elemente (DOE) aufweisen oder unstrukturiert sind und welche beleuchtet wird durch einen Lichtsender (5), welcher Licht der Wellenlänge (λ) emittiert, dass die Maßverkörperung (10) von einem photoelektrischen Abtaster (40) detektiert wird, welcher ein Array von lichtempfindlichen Flächen entsprechend der Codierung der Maßverkörperung (10) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die DOE auf der Maßverkörperung (10) derart gestaltet sind, dass mindestens die nullte Beugungsordnung des transmittierten Lichtes ausfällt, dass weiterhin eine refraktive Linse (20) mit positiver Brennweite (f) zwischen der Maßverkörperung (10) und dem Abtaster (40) angeordnet ist, dass eine Aperturblende (30) in etwa der Brennebene der Linse (20) zwischen der Linse (20) und dem Abtaster (40) positioniert ist und dass der Durchmesser (a) der Blende (30) kleiner ist als $2 f \tan(\alpha)$ im Falle, dass die DOE des Maßstabes (10) zum Abtaster (40) hin weisen, und dass der Durchmesser (a) der Blende (30) kleiner ist als $2 f \tan(\beta)$ im Falle, dass die DOE des Maßstabes (10) zur Lichtquelle (5) hin weisen, mit der Brennweite (f) der Linse (20), dem Brechungsindex (n) des Maßstabmaterials (10), und einem Winkel (β), welcher der Gleichung $\sin(\beta) = n \sin(\alpha)$ genügt, wobei (α) der Beugungswinkel der ersten nicht-unterdrückten Beugungsordnung der DOE ist.

2. Vorrichtung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das DOE durch ein Durchlicht-Phasen-Stufengitter gegeben ist mit Stufenhöhe

$$h = \frac{\lambda}{2(n_1 - n_0)},$$

mit einem Brechungsindex (n_1) des Maßstabmaterials (10, 11) und mit einem Brechungsindex (n_0) des die Furchen ausfüllenden Substratmaterials (12).

3. Vorrichtung nach Patentanspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat (12) aus Luft besteht und somit der Brechungsindex $n_0 \approx 1$ ist.

4. Vorrichtung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine weitere Linse (21) mit positiver Brennweite (f') zwischen der Aperturblende (30) und dem Abtaster (40) angeordnet wird, und dass der Abstand der Aperturblende (30) zur weiteren Linse (21) nominell (f') beträgt.

5. Vorrichtung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine einzige abbildende Linse (20) benutzt wird, dass die Bildweite (b), i.e. der Abstand zwischen der Linse (20) und dem Abtaster (40), größer ist als die Brennweite (f) der Linse (20) und dass die Gegenstandsweite (g), i.e. der Abstand zwischen der Maßverkörperung (10) und der ersten Linse (20), kleiner oder gleich ist als

$$\frac{fb}{b-f}.$$

6. Vorrichtung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand zwischen der Maßverkörperung (10) und der ersten Linse (20) kleiner oder gleich der Brennweite (f) der Linse (20) ist.

7. Vorrichtung zur mikrooptischen Positionsmessung mit einer transmissiven Maßverkörperung (10), die eine binäre Codierung in Form von Flächen trägt, wobei diese Flächen entweder diffraktive optische Elemente (DOE) aufweisen oder unstrukturiert sind und welche beleuchtet wird durch einen Lichtsender (5), welcher Licht der Wellenlänge (λ) emittiert, dass die Maßverkörperung (10) von einem photoelektrischen Abtaster (40) detektiert wird, welcher ein Array von lichtempfindlichen Flächen entsprechend der Codierung der Maßverkörperung (10) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die DOE auf der Maßverkörperung (10) derart gestaltet sind, dass zumindest die nullte Beugungsordnung des transmittierten Lichtes ausfällt, dass weiterhin der Maßstab (10) von der mittels der DOE mikrostrukturierten Seite aus beleuchtet wird und dass die Bedingung

$$\sin(\alpha) \geq \frac{1}{n}$$

erfüllt ist mit dem Beugungswinkel (α) der ersten nicht-unterdrückten Beugungsordnung und dem Brechungsindex (n) des Maßstabmaterials (10).

8. Vorrichtung nach Patentanspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass als DOE ein Stufen-Phasengitter mit